

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ЭЛЕКТРО- И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Коняев А.Ю., Коняев И.А., Шуматов М.В.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия, E-mail: a.u.konyaev@urfu.ru

Аннотация — На основе сравнительного анализа методов обогащения измельченных отходов электро- и радиотехнической промышленности показано, что для получения селективных концентратов металлов предпочтительны электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем. Для сепарации измельченных отходов (с крупностью металлических частиц менее 5 мм) обоснована необходимость использования бегущего магнитного поля повышенной частоты (до нескольких кГц). Описан экспериментальный сепаратор индукторного типа, позволяющий получить частоту модулированного бегущего магнитного поля до 2,5 кГц.

Ключевые слова — *измельченный электронный лом, электродинамический сепаратор, модуляция поля, опытная установка.*

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений энерго- и ресурсосбережения, позволяющим одновременно решать природоохранные задачи, является утилизация твердых металлосодержащих отходов. Извлечение металлов из таких отходов позволяет получить относительно дешевое сырьё для вторичной металлургии и создает предпосылки для полезного использования остальных компонентов отходов. Наиболее быстрорастущей составляющей твердых отходов, содержащих цветные металлы, являются отходы электро- и радиотехники: электронный лом (отслужившие свой срок компьютеры, телефоны, радиотехнические изделия, электронные блоки электротехнических установок), кабельный и проводниковый лом, отходы производства электро- и радиотехнических изделий, отходы электролампового производства и т.д. Такие отходы представляют собой многокомпонентные смеси различных металлов (медь, алюминий, железо, золото, серебро и др.) и изоляционных материалов (пластмассы, резина, стекло, керамика) [1-4].

Отличительной чертой отходов электро- и радиотехники является то, что в большинстве случаев материалы содержатся в них в виде сростков. Это обуславливает необходимость измельчения отходов для раскрытия отдельных материалов с последующим разделением их на фракции. Процессы дробления, измельчения, классификации и обогащения отходов должны обеспечивать возможность получения качественного вторичного сырья, но в настоящее время являются дорогостоящими. Технологические

цепочки такого оборудования для рассматриваемых измельченных отходов имеют ряд слабых мест. Поэтому от их совершенствования зависит решение проблемы утилизации отходов электро- и радиотехники в целом. Наибольший эффект могут дать развитие технологий и оборудования для обогащения отходов. В данной работе обсуждаются возможности создания такого оборудования.

ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ СЕПАРАЦИИ

В настоящее время для разделения измельченного электронного лома на фракции применяют такие методы обогащения как: пневмосепарация, тяжелосредная сепарация, электромагнитные методы [1-2, 4]. При пневмосепарации разделительным признаком является скорость витания частиц. При одинаковой форме и размерах измельченных частиц разделительным признаком можно считать удельный вес материалов. Поэтому при пневмосепарации можно разделить отходы на тяжелую и легкую фракции. В легкую фракцию выходят изоляционные материалы, удельный вес которых ($1,6-2,0 \text{ г/см}^3$) меньше веса металлов. На практике трудно обеспечить одинаковую форму и размеры всех частиц, что приводит к взаимозасоренности продуктов сепарации. Например, в легкую фракцию могут попадать металлы, обладающие удельным весом $1,7-4,5 \text{ г/см}^3$ (магний, алюминий, титан). Этим объясняется и невозможность получения при пневмосепарации селективных концентратов металлов. Недостатком метода является также потеря пылевидных фракций материалов, уносимых потоком воздуха.

Возможность получения селективных концентратов металлов имеется при тяжелосредной сепарации отходов (сепарация в тяжелых жидкостях или суспензиях), где происходит разделение материалов по плотности. Применение метода ограничивается его высокой стоимостью, обусловленной необходимостью подбора жидкостей с плотностью промежуточной между плотностями разделяемых материалов, а также необходимостью регенерации жидкостей. Перспективы такого направления обработки отходов связаны с развитием магнитогравиметрических методов сепарации, в которых используются парамагнитные и ферромагнитные жидкости.

Среди электромагнитных методов обогащения наиболее развиты магнитная и электростатическая

сепарации, широко применяемые в горно-обогатительном производстве. Магнитные сепараторы – железоотделители, позволяющие выделять из смешанных отходов ферромагнитную фракцию (железо, никель, ферриты), используются на первых стадиях обогащения отходов, чем обеспечивается надежность работы оборудования на следующих этапах и высокое качество продуктов обогащения.

Электростатическая сепарация обеспечивает надежное разделение измельченных материалов на проводящую и непроводящую фракции. Продукты разделения: коллективные концентраты металлов и изоляционных материалов. К недостаткам можно отнести необходимость подготовки отходов по крупности частиц, как правило, до размеров менее 1 мм, и использование установок высокого напряжения (десятки киловольт), требующих обеспечения повышенных мер безопасности и высокой квалификации обслуживающего персонала.

Широкое применение при обработке отходов электро- и радиотехники может найти электродинамическая сепарация, практически не получившая распространения при обогащении минерального сырья. В таком методе для разделения материалов используются различия в их удельной электропроводности и удельном весе. При электродинамической сепарации возможно получение селективных концентратов металлов. В зависимости от вида отходов и крупности извлекаемых металлических частиц могут применяться установки электродинамической сепарации с пульсирующими, импульсными или бегущими магнитными полями.

В мировой практике для обогащения отходов электро- и радиотехники чаще всего применяются электродинамические сепараторы с бегущим или вращающимся магнитным полем, отличающиеся как способами возбуждения поля, так и способами подачи материалов в рабочую зону и отвода продуктов сепарации. Выбор конкретной конструкции таких сепараторов зависит от решаемой задачи, производительности установок и крупности извлекаемых металлических включений. Для сепарации измельченных отходов необходимы бегущие магнитные поля повышенной частоты.

III. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СЕПАРАТОРЫ ИНДУКТОРНОГО ТИПА

Одной из проблем, сдерживающих распространение электродинамических сепараторов, является существенная зависимость их характеристик от крупности извлекаемых металлических частиц. Например, на рис. 1 показана зависимости удельного электромагнитного усилия извлечения ($F_m = F/m$ – отношения электромагнитного усилия к массе частиц, Н/кг или м/с) от крупности частиц, полученные для сепаратора с линейным индуктором, бегущее магнитное поле которого характеризуется следующими параметрами: полюсное деление $\tau = 66$ мм, частота $f = 50$ Гц, амплитуда магнитной индукции $B_m = 0,23$ Тл. Расчеты выполнены по [5] для частиц квадратной формы толщиной 2 мм из алюминиевых сплавов (удельная электропроводность

$\gamma = 20 \times 10^6$ См/м; плотность $\rho = 2,7$ кг/дм³), из проводниковой меди ($\gamma = 56 \times 10^6$ См/м; $\rho = 8,7$ кг/дм³) и из латуни ($\gamma = 20 \times 10^6$ См/м; $\rho = 8,7$ кг/дм³).

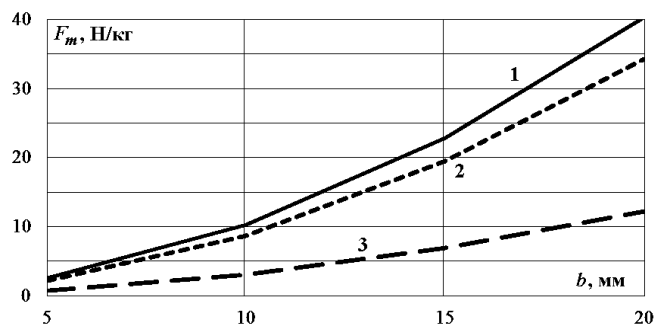


Рис.1. Зависимости удельного электромагнитного усилия от крупности частиц из различных металлов:

1 – сплавы алюминия; 2 – проводниковая медь;
3 – латунь

Из рис. 1 видно, что удельные электромагнитные усилия, развиваемые в электродинамическом сепараторе, для разных металлов различны. Это создает возможность для селективной сепарации электронного лома, что было подтверждено при обработке фракций электронного лома крупностью 10-20 мм на экспериментальной установке электродинамической сепарации с указанными выше параметрами бегущего магнитного поля. В то же время, как следует из рис. 1, удельные электромагнитные усилия быстро падают с уменьшением размеров частиц. В случае измельченного лома с крупностью частиц менее 3-5 мм они становятся недостаточными для преодоления сил сопротивления движению.

В [5] получены выражения, связывающие требуемое отклонение частиц от линии подачи для выделения их из потока материалов с электромагнитными и механическими силами, воздействующими на частицу. По ним можно определить требуемое для извлечения удельное электромагнитное усилие. Например, при горизонтальной подаче исходного материала в зону сепарации и поперечном выходе извлекаемых металлических частиц такое выражение для удельного усилия имеет вид

$$F_m = \frac{2 \cdot B \cdot V_{\kappa}^2}{L_u^2} + k_{mp} \cdot g. \quad (1)$$

На рис.2 показаны рассчитанные по (1) зависимости F_m от скорости подачи материала в зону сепарации V_k , рассчитанные для следующих условий: требуемое отклонение частиц $B = 20$ или 40 мм; ширина активной зоны индуктора $L_n = 45$ мм; коэффициент трения $k_{тр} = 0,3$; ускорение свободного падения $g = 9,8$ м/с.

Нетрудно видеть, что повышение производительности установок, связанное с ростом скорости подачи сепарируемой смеси V_k и размера B требует существенного увеличения удельных электромагнитных усилий.

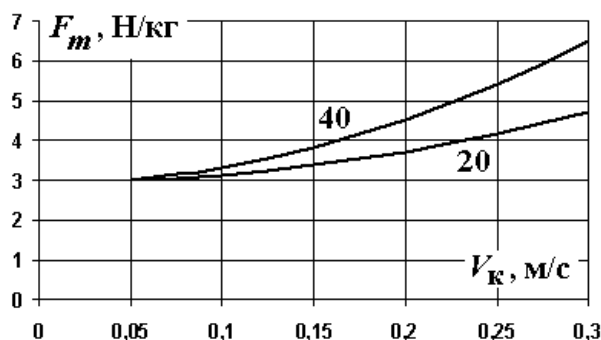


Рис. 2. Зависимость требуемого удельного электромагнитного усилия от скорости подачи материала при двух значениях отклонения частиц от линии подачи (20 и 40 мм)

Для увеличения электромагнитного усилия, действующего на измельченные металлические частицы нужно изменять параметры бегущего магнитного поля (оптимизировать полюсное деление, повысить индукцию и частоту). Поскольку увеличение значения индукции бегущего магнитного поля ограничено возможностями охлаждения обмоток индуктора, то необходимо использовать магнитные поля повышенной частоты. На рис. 3 показаны удельные электромагнитные усилия, рассчитанные при неизменных значениях $\tau = 66$ мм и $B_m = 0,23$ Тл для частиц тех же металлов при крупности частиц 2 мм. Можно видеть, что максимальные значения удельных усилий достигаются при частотах в несколько десятков кГц. Частоты, соответствующие максимуму усилия у разных металлов могут отличаться, что обуславливает пересечение кривых. Такое пересечение означает возможность взаимозасорения фракций и ухудшение качества сепарации. В то же время требуемые значения F_m (превышающие показанные на рис.2) достигаются уже при частотах в несколько кГц. В указанном диапазоне частот (до 10 кГц) зависимости $F_m(f)$ практически линейны. В этом случае разделительным признаком при сепарации металлов однозначно становится величина γ/ρ (отношение удельной электропроводности к плотности металла).

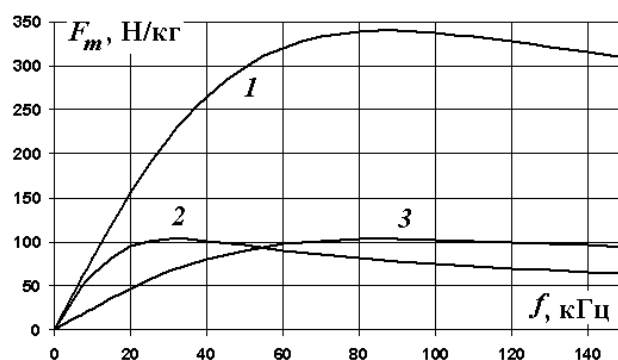


Рис. 3. Влияние частоты магнитного поля на удельные электромагнитные усилия, развиваемые в сепараторе для частиц из разных металлов (1 – алюминиевые сплавы; 2 – медь; 3 – латунь)

Для получения бегущего магнитного поля с частотой несколько кГц целесообразно использование электродинамических сепараторов индукторного типа с модуляцией магнитного потока. Один из вариантов такого сепаратора разработан и изготовлен в лаборатории Уральского федерального университета. Основные элементы конструкции электромагнитного ядра сепаратора показаны на рис. 4, а схема перемещения извлекаемых при сепарации металлических частиц – на рис. 5.

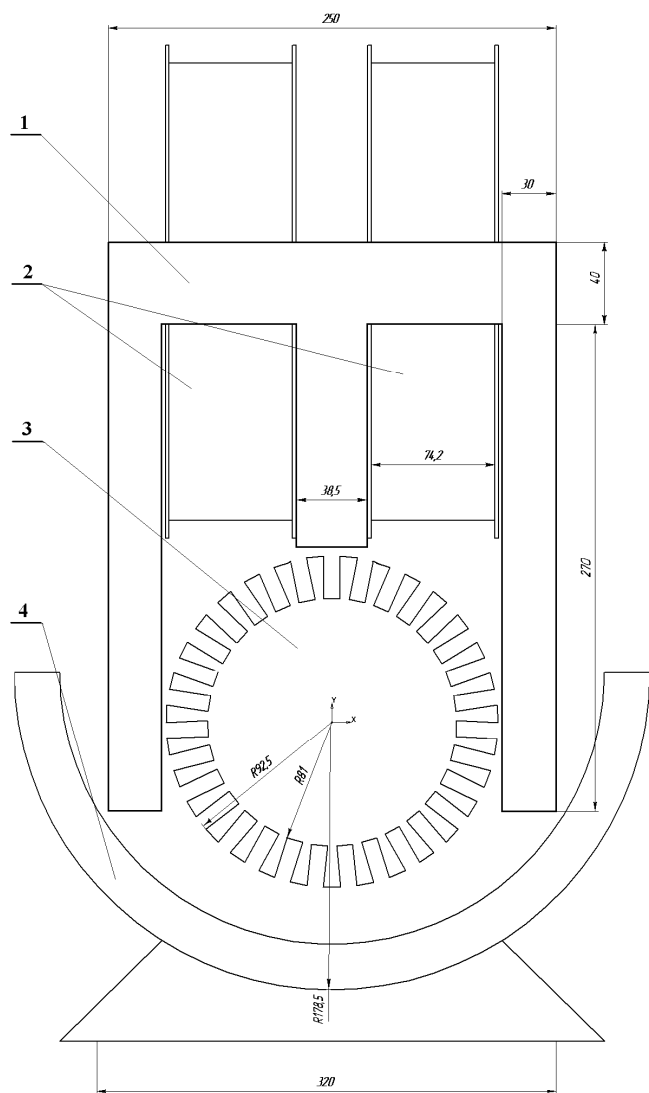


Рис. 4. Конструкция электромагнитного ядра сепаратора индукторного типа:

1 – магнитопровод; 2 – обмотка возбуждения; 3 – зубчатый ротор; 4 – станина

Обмотка возбуждения индуктора 2, питаемая от источника постоянного тока, создает магнитный поток, проходящий по магнитопроводу 1 и замыкающийся через ротор 3. Индукторная система и ротор укреплены на станине 4. Каждая из катушек обмотки возбуждения имеет по 2570 витков. При последовательном соединении катушек сопротивление обмотки возбуждения составляет 52,7 Ом. Питание обмотки осуществляется от стандартного полупроводникового выпрямителя типа ВСА (заводской № 27107), обеспечивающего на выходе выпрямленное напряжение и ток до 240 В и 2 А. При номинальном напряжении 110 В в обмотке возбуждения сепаратора протекает ток 1,98 А,

значение которого в дальнейшем используется в расчетах.

Зубчатый ротор установки через ременную передачу приводится во вращение асинхронным двигателем АОЛ 31-2 мощностью 0,4 кВт. Изменение скорости вращения ротора сепаратора и частоты бегущего магнитного поля достигается при частотном регулировании двигателя. В качестве источника питания использовался модернизированный преобразователь частоты ТПТР - 10 - 230 - 200.

В воздушных зазорах между стержнями магнитопровода и зубчатым ротором модулируется бегущее магнитное поле. Боковые воздушные зазоры являются технологическими и выполняются минимально возможными (не более 1 мм). Немагнитный зазор под центральным стержнем является рабочим и составляет зону сепарации. При выбранном значении такого зазора $\delta = 5$ мм достигаются следующие параметры бегущего магнитного поля: амплитуда индукции; полюсное деление $\tau = 9,4$ мм; частота $f = 500-2500$ Гц.

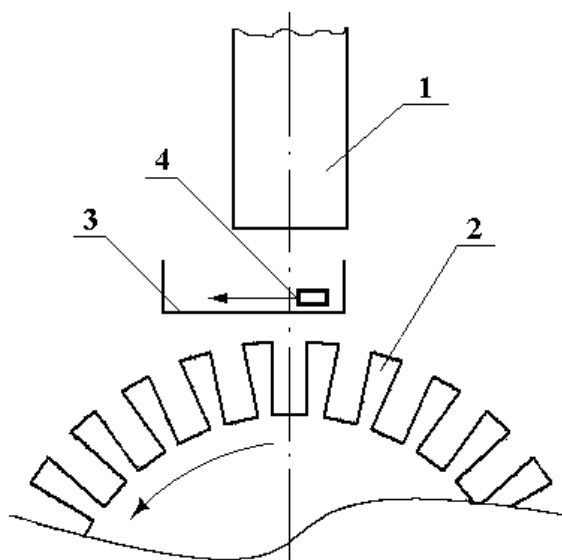


Рис. 5. Схема сепарации проводящей частицы в установке индукторного типа:

1 – полюс индуктора; 2 – ротор; 3 – жёлоб для подачи разделяемой смеси; 4 – извлекаемая частица

Измельченный сепарируемый материал подаётся в зону сепарации по несущей поверхности (виброжёлоб, или лента конвейера) как показано на рис. 5. Частицы выделяемого продукта (например, алюминия), взаимодействуя с полем, выталкиваются из под полюса на левый край несущей поверхности и на

выходе сепаратора выделяются в отдельную фракцию. Более тяжелые частицы медных сплавов смещаются незначительно, а частицы изоляционных материалов движутся по несущей поверхности без отклонений.

Для указанных выше параметров бегущего магнитного поля по методике, описанной в [6], были выполнены расчеты удельных электромагнитных усилий извлечения для частиц из алюминиевых сплавов ($\gamma=20 \times 10^6$ См/м; $\rho=2,7$ кг/дм³) и латуни ($\gamma=20 \times 10^6$ См/м; $\rho=8,7$ кг/дм³). Результаты таких расчетов для частиц крупностью 0,5; 1,0 и 2,0 мм показаны в таблице.

Таблица
Зависимость достигаемого удельного усилия от частоты поля и размера алюминиевых (числитель) и латунных (знаменатель) частиц

| f , Гц | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $F_{m(0,5)}$, Н/кг | $\frac{0,31}{0,097}$ | $\frac{0,62}{0,193}$ | $\frac{0,94}{0,290}$ | $\frac{1,25}{0,387}$ | $\frac{1,56}{0,484}$ |
| $F_{m(1,0)}$, Н/кг | $\frac{1,25}{0,39}$ | $\frac{2,49}{0,77}$ | $\frac{3,74}{1,16}$ | $\frac{4,99}{1,55}$ | $\frac{6,23}{1,93}$ |
| $F_{m(2,0)}$, Н/кг | $\frac{4,99}{1,55}$ | $\frac{9,97}{3,09}$ | $\frac{14,95}{4,64}$ | $\frac{19,91}{6,18}$ | $\frac{24,86}{7,72}$ |

Сравнение данных, приведенных в таблице, со значениями требуемых удельных электромагнитных усилий, рассчитанных ранее для заданных отклонений извлекаемых частиц 20 и 40 мм (рис. 2), показывает, что при указанных параметрах индуктора созданная установка может обеспечить извлечение алюминиевых частиц крупностью более 1 мм и латунных частиц крупностью 2 мм. В то же время видно, что удельные усилия, получаемые для латунных частиц крупностью 2 мм, близки к удельным усилиям для алюминиевых частиц с размерами 1 мм. Поэтому при подготовке электронного лома к сепарации необходима классификация материалов по крупности в более узком диапазоне размеров.

Значения удельных электромагнитных усилий, приведенные в таблице для крупности частиц 0,5 мм, не обеспечивают извлечения из исходной смеси ни латунных, ни алюминиевых частиц. В то же время подача в сепаратор материалов с крупностью частиц менее 1 мм позволяет уменьшить немагнитный зазор в зоне сепарации и, следовательно, увеличить индукцию магнитного поля и значения развиваемых электромагнитных усилий. Например, при том же токе возбуждения и зазоре $\delta = 3$ мм достигается амплитуда

индукции бегущей составляющей магнитного поля $B_m = 0,219$ Тл. Отметим, что выбранная конструкция магнитной системы сепаратора допускает регулирование немагнитного зазора в рабочей зоне при неизменных и минимальных боковых зазорах.

Удельные электромагнитные усилия извлечения, развиваемые в сепараторе при рабочем зазоре $\delta = 3$ мм, показаны на рис. 6. Для сравнения показан уровень минимального требуемого усилия (с рис. 2).

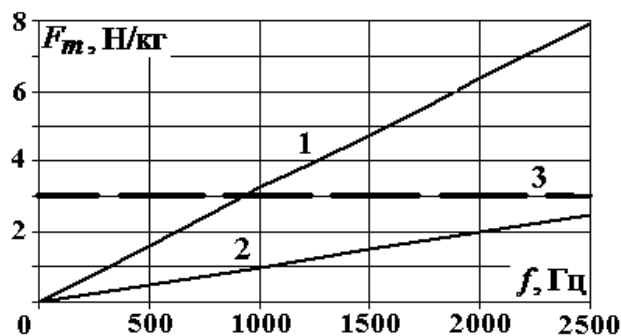


Рис. 6. Зависимости удельных усилий от частоты при $B_m = 0,219$ Тл для частиц крупностью 0,5 мм
1 – алюминий, 2 – латунь, 3 – минимальное требуемое усилие

Нетрудно видеть, что при малой производительности сепаратора извлечение алюминиевых частиц крупностью 0,5 мм достигается уже при частоте 1000 Гц. При этом усилия, создаваемые на латунных частицах существенно меньше требуемых для извлечения. Это является необходимым условием для получения селективных концентратов металлов. При частоте 2500 Гц указанный эффект достигается при максимальном значении производительности установки, соответствующей данным рис. 2.

Отметим, что полученные при теоретическом анализе результаты нашли принципиальное подтверждение при испытаниях опытного образца электродинамического сепаратора индукторного типа, описанного ранее. Для более детальных экспериментальных исследований необходимо совершенствование механизмов подачи сепарируемого материала в рабочую зону и отвода продуктов разделения.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сопоставление различных методов сепарации измельченных металлосодержащих отходов указывают на целесообразность использования электродинамической сепарации. Выполненные исследования электродинамического сепаратора индукторного типа выявили принципиальную возможность получения селективных металлических концентратов при сепарации измельченных электро- и радиотехнических отходов и позволили выработать рекомендации как по изготовлению сепаратора и выбору режимов его работы, так и по предварительной подготовке измельченных отходов (классификации материала по фракциям в более узких диапазонах размеров).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шубов Л.Я., Технология отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. – 352 с.
2. Цыпин Е.Ф. О переработке электронного лома и отходов // Известия вузов. Горный журнал, 1997, № 11-12, с.233-239.
3. Карпов Ю.А., Переработка вторичного сырья, содержащего драгоценные металлы / под ред. Карпова Ю.А.. – М.: Гиналмаззолото, 1996. – 290 с.
4. Медведев А., Утилизация продуктов производства электроники / А. Медведев, С. Арсентьев // Компоненты и технологии, 2008, № 10, с. 153-159.
5. Коняев А.Ю., Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. 104 с.
6. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Исследование характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели // Электротехника, 1998, № 5, с.52-57.